干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

近60 a新疆塔城地区不同相态降水时空变化特征

高　婧[1]，　杨　涛[2]，　李海燕[2]，　井立红[3]，　刘振新[4]，　曾　华[3]

（1. 沙湾市气象局，新疆 沙湾　832100；2. 新疆气候中心，新疆 乌鲁木齐　830002；3. 塔城地区气象局，新疆 塔城　834700；4. 新疆气象局信息中心，新疆 乌鲁木齐　830002）

摘　要：基于1961—2020年9个国家气象观测站逐日资料，采用气候统计学方法分析了塔城地区不同相态降水的时空分布及变化规律，探讨了降水相态的变化成因及其可能影响。结果表明：(1) 近60 a塔城地区年平均降水日数88.1 d，其中降雨日数最多，降雪日数次之，雨夹雪日数最少；3种相态降水在空间上呈现地区西北部多、中东部少的分布格局。(2) 从不同相态降水日数的月际分布来看，降雨主要出现在4—9月，降雪在11月—翌年3月较多，3—4月和10—11月期间3种相态降水共存。(3) 近60 a塔城地区各站不同相态降水的变化趋势存在一定的差异，总体呈现降雨日数增加而降雪日数减少的变化趋势，且降雨量的增速高于降雪量增速，其结果导致雪雨比率以−0.33%·$(10a)^{-1}$的速率减小。(4) 气温增暖是塔城地区降水相态向多雨化转变的主要原因，同时北极涛动指数（Arctic oscillation index，AO）、北大西洋涛动指数（North Atlantic oscillation index，NAO）以及北半球极涡指数对降水相态的变化也有一定的影响。

关 键 词：不同相态降水；时空变化；大气环流；新疆塔城地区

文章编号：

降水是地球水循环和能量循环的关键环节之一，降水以雨、雪和雨夹雪等多种相态降落在地面，每种相态对地表径流和能量平衡都有重要影响[1-2]。有学者研究发现，全球超过50%的气象灾害与降水相态密切相关[3]，相同的降水量不同的相态所产生的影响有着显著差异[4-5]。关于不同相态降水的研究成果较多，主要是针对特定区域降水相态时空变化特征进行分析，如华东地区冬季雨、雪分界线在29°N、120°E附近[4]；江淮地区各相态降水以减少趋势为主，海拔高度与降水日数呈显著正相关[5]；黄土高原降雨、降雪呈波动下降，雨夹雪呈波动上升趋势[6]；河西走廊东部降雨日数、降雪日数从东北向西南增多[7]。还有一些研究结合特性层温度法和厚度差法等建立降水相态判别指标及预报模型[8-9]，亦或是针对典型降水相态转换天气过程进行诊断分析或数值模拟[10-11]。不同相态的降水如果发生转变，必然影响区域水资源的产汇流过程及年内分配，而气温是影响降水相态转变的关键驱动因子[12]。由于气候变暖导致的降水类型发生变化在国外已备受关注，气温增暖导致部分固态降水转化为液态降水，有的是降雨增加而降雪减少[13]，有的是降雨增速大于降雪增速或降雪减速大于降雨减速[14-15]，从而影响降雪比率或雪雨比率的变化；同样地，中国青藏高原降雨量显著增加，降雪量减少，降雪比率的年际和季节变化呈下降趋势[16]；新疆博尔塔拉河谷和天山中部南坡雪雨比呈增加趋势，而伊犁河谷和天山北坡的西部和中部呈减少趋势[17]。雪雨比率的变化对地表径流、能量循环和物质循环有一定的影响，直接影响到河流水源补给的类型，影响到季节性河流汛期的变化[18]。由此可能大大增加冬季洪水发生率或是早春洪涝灾害、夏季水资源短缺和各种次生灾害风险[19]，给社会生产和人民生活带来诸多不利影响。

目前塔城地区对于降水相态变化的研究鲜有

收稿日期：2022-01-15；　**修订日期**：2022-04-21

基金项目：国家重点研发计划（2019YFC1510501）；中国沙漠气象科学研究基金（Sqj2017008）；新疆气象科技创新发展基金项目（MS202217）资助

作者简介：高婧（1978-），女，硕士，高级工程师，主要从事预报预测及气候变化研究. E-mail: 1575035865@qq.com

通讯作者：井立红（1971-），女，高级工程师，主要从事短期天气预报预测. E-mail: 463275155@qq.com

报道，已有的研究多将降水按暖季和冷季划分，没有进行相态（雨、雪、雨夹雪）区分。在全球气候增暖的背景下，开展塔城地区不同相态降水气候特征和变化规律的研究有利于提高降水相态预报水平，为气候变化对降水相态的影响研究提供分析依据。

1　研究区概况

塔城地区位于新疆西北部，地处亚欧大陆腹地中心位置，属中温带干旱和半干旱气候区，地理位置界于82°16′~87°21′E、43°25′~47°15′N之间，境内有7条主要山脉，高差悬殊，地形复杂，地貌多样，地域性气候特征显著。基于行政区划的研究往往不易考虑相邻区域地形和气候特征，参照文献[20]划分方法，将塔城地区7个县（市）及克拉玛依市和炮台镇简称"塔城地区"，依据地理位置及区域气候特征划分为3个子区，地区西北部（塔城市、裕民县、额敏县、托里县）、地区南部（炮台镇、乌苏市、沙湾市）、地区中东部（克拉玛依市、和布克赛尔县）。

2　数据与方法

2.1　数据来源

1961—2020年研究区域9个国家地面气象观测站数据来源于新疆气象信息中心，大气环流指数来源于国家气候中心。将现行地面综合观测业务软件（Integrated surface observation system，ISOS）中的8类降水现象，按雨（雨、阵雨、毛毛雨）、雪（雪、阵雪）、雨夹雪（雨夹雪、阵性雨夹雪）3种相态进行分类，由于冰雹出现的几率极小且常与阵雨相伴随出现，将其并入雨类。若一日内出现雨夹雪或雨、雪混合降水，则统计为雨夹雪。剔除雾、露、霜凝结产生的降水，将一日内降水量≥0.1 mm统计为一个降水日，24 h内观测到1次及以上该天气现象记为1 d。

2.2　研究方法

塔城地区3种相态降水的气候特征采用1961—2020年9个站点算术平均值表征。将各个站点3种相态降水的多年平均降水日数和降水量采用Kriging插值方法得到空间分布状况。利用最小二乘法[21]计算各站3种相态降水日数和降水量的气候倾向率，以0.05作为通过显著性检验的标准。运用平均值（x）和均方差（σ）判断指标[7]对年降雨日数、降雪日数和雨夹雪日数的异常性进行判别，若日数波动值在$x\pm\sigma$之间，为正常年；若日数波动值在$x\pm\sigma$和$x\pm2\sigma$之间，为偏多年或偏少年；若日数波动值在$x\pm2\sigma$范围之外，为特多年或特少年。采用Pearson相关法分析不同相态降水的变化与地理位置及大气环流的关系。

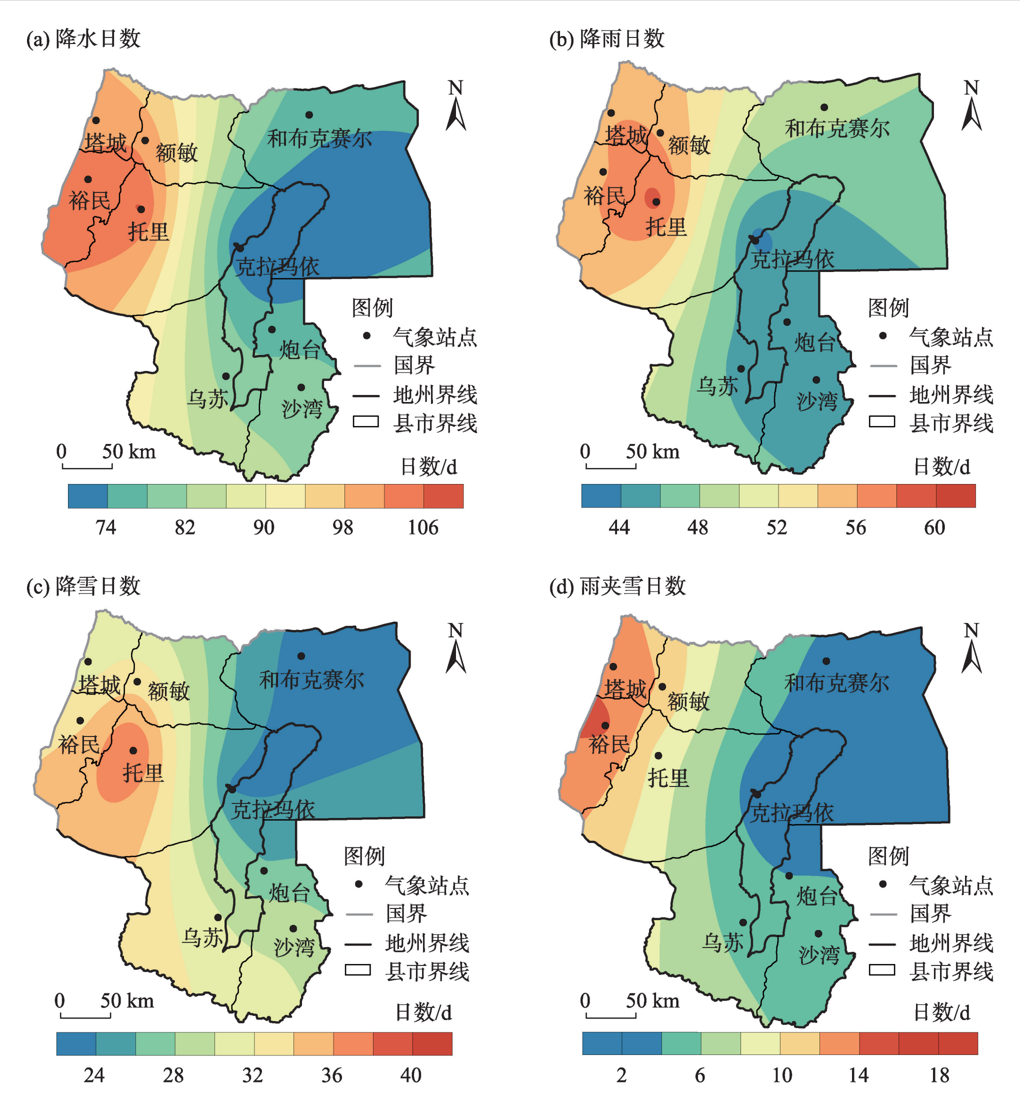
3　结果与分析

3.1　不同相态降水的空间分布特征

3.1.1　不同相态降水日数和降水量空间分布　塔城地区年平均降水日数空间分布差异明显，地区西北部在99.8~106.2 d之间，地区南部在75.7~80.6 d之间，地区中东部在70.1~75.4 d之间，最大值出现在托里（106.2 d），最小值出现在克拉玛依（70.1 d）（图1a）；降雨日数空间分布特征表现为地区西北部最多（55.7~58.6 d），地区南部和中东部在43.5~46.0 d之间，最大值出现在托里（58.6 d），最小值出现在克拉玛依（43.5 d）（图1b）；降雪日数空间分布与年降水日数相似，地区西北部最多（30.7~38.3 d），地区南部次之（26.3~30.2 d），地区中东部最少（23.3~24.0 d），最大值出现在托里（38.3 d），最小值出现在和布克赛尔（23.3 d）（图1c）；雨夹雪日数空间分布自西北向东南递减，地区西北部最多（9.4~14.3 d），地区南部和中东部相差不大（2.9~5.3 d），最大值出现在裕民（14.3 d），最小值出现在克拉玛依（2.9 d）（图1d）。

塔城地区年平均降水量的空间分布表明（图2a），地区西北部年平均降水量在251.6~298.7 mm之间，地区南部在153.6~203.4 mm之间，地区中东部在115.1~147.4 mm之间，不足地区西北部的1/2。降水量最大值出现在裕民（298.7 mm），最小值出现在克拉玛依（115.1 mm）。图2b~d显示，各站3种相态降水量的空间分布与其对应的降水日数基本一致，其中托里降雨量最多（188.7 mm），裕民雨夹雪量（58.8 mm）和降雪量（59.9 mm）最多，克拉玛依降雨量（95.7 mm）、降雪量（15.2 mm）和雨夹雪量（4.2 mm）均为最少。

综上所述，塔城地区各站不同相态降水量的空间分布与降水日数大体一致，两者之间存在显著正相关，相关系数在0.57~0.81之间（$P<0.01$），即降水日数多，则降水量也多，这与前人对江淮地区[5]和河西走廊东部[7]不同相态降水的分析结论相似。受地理位置、地形和山势走向的影响，塔城地区不同相



注：该图基于新疆维吾尔自治区地理信息平台标准地图服务网站下载的审图号为新S(2021)007号的标准地图制作，底图边界无修改。下同。

图1　1961—2020年塔城地区不同相态降水年平均日数空间分布

Fig. 1　Spatial distributions of annual mean days of different precipitation types in Tacheng area from 1961 to 2020

态降水总体表现为地区西北部多、中东部少的分布格局。地区西北部的塔额盆地向西开口的喇叭口地形利于风速加强而促进水汽输送加大，利于承接更多的水汽，降水较多；地区中东部的克拉玛依、和布克赛尔位于准噶尔西部山脉的背风坡，降水较少。

3.1.2　不同相态降水变化特征　塔城地区年平均降水日数以0.59 d·(10a)$^{-1}$的速率不显著增加，年平均降水量以8.87 mm·(10a)$^{-1}$的速率显著增加(表1)，与谢培等[22]指出的新疆年降水日数和降水量总体处于上升趋势的结论一致。各站中除额敏、炮台降水日数不显著减少，其余站呈现增多趋势，尤其是乌苏以3.83 d·(10a)$^{-1}$的速率极显著增加；各站年降水量均呈增加趋势，地区南部显著增加。

塔城地区降雨日数以0.48 d·(10a)$^{-1}$的速率不显著增加，降雨量以6.53 mm·(10a)$^{-1}$的速率显著增多，各站中仅炮台降雨日数不显著减少，降雨量显著增加，其余站降雨日数和降雨量均呈增加趋势。塔城地区降雪日数不显著减少，其中额敏、炮台显著减少，而乌苏以2.86 d·(10a)$^{-1}$的速率极显著增加；降雪量除额敏和炮台不显著减少外，其余均呈增加趋势。塔城地区雨夹雪日数和雨夹雪量总体不显著增加，地区中东部表现为减少趋势。

3.2　不同相态降水时间变化特征

3.2.1　不同相态降水的月际分布　塔城地区不同相态降水日数的月际分布(图3a)表明，4—9月为降雨主要出现时段，以7月为峰值(9.3 d)，向两端递减；降雪在11月—翌年3月出现较多，以12月最多(8.1 d)，

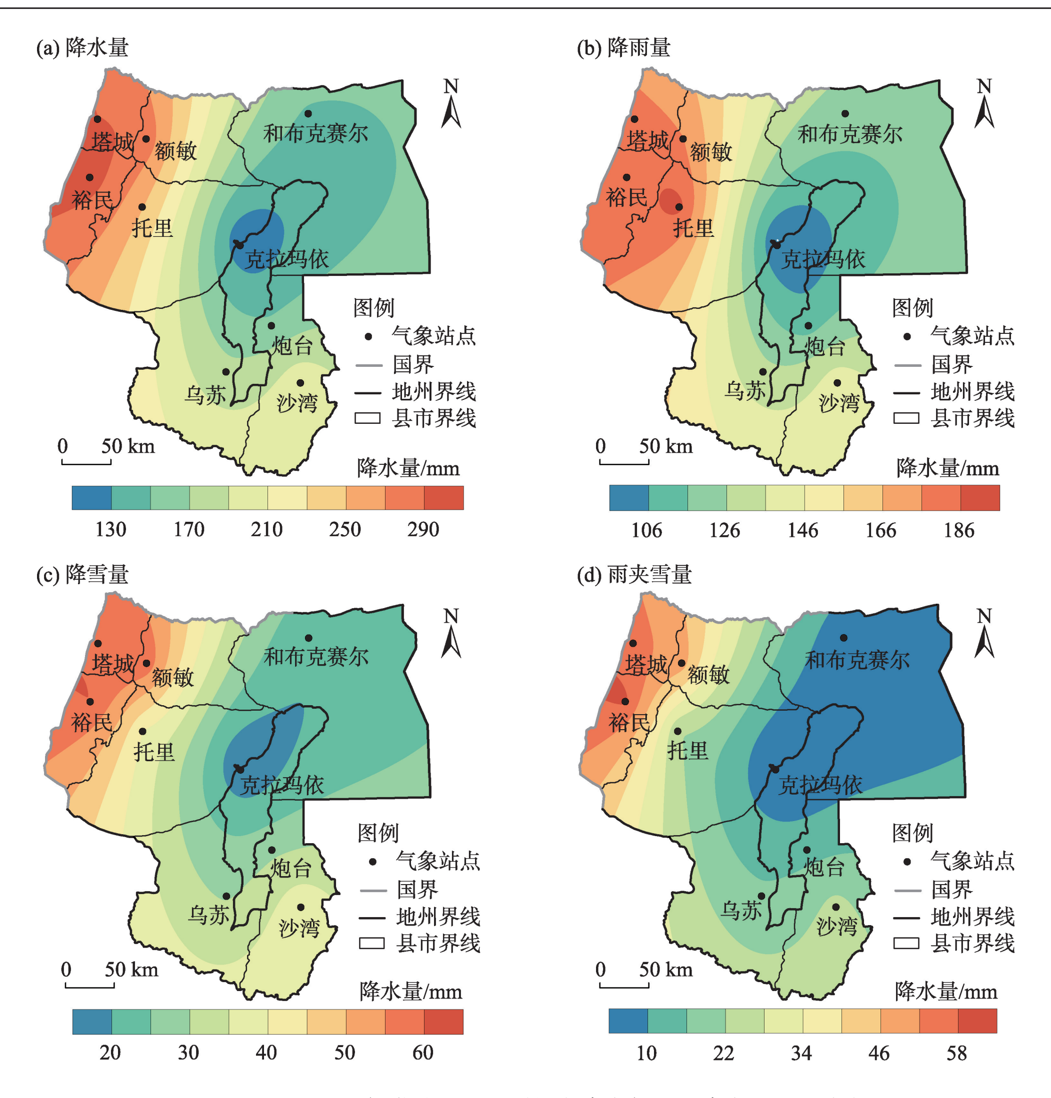


图2 1961—2020年塔城地区不同相态降水年平均降水量空间分布

Fig. 2 Spatial distributions of amount of different precipitation types in Tacheng area from 1961 to 2020

表1 塔城地区不同相态降水线性倾向率

Tab. 1 Linear tendency rates of different precipitation types in Tacheng area

站点	年降水		降雨		降雪		雨夹雪	
	日数 /d·(10a)$^{-1}$	降水量 /mm·(10a)$^{-1}$	日数 /d·(10a)$^{-1}$	降水量 /mm·(10a)$^{-1}$	日数 /d·(10a)$^{-1}$	降水量 /mm·(10a)$^{-1}$	日数 /d·(10a)$^{-1}$	降水量 /mm·(10a)$^{-1}$
塔城	0.20	8.12	0.26	4.37	−0.48	1.52	0.42	2.23
裕民	0.11	13.70*	0.69	7.67*	−0.71	3.74*	0.14	2.30
额敏	−1.17	5.29	0.11	6.77	−1.37*	−1.56	0.08	0.07
托里	0.34	8.43	0.94	8.00	−0.42	1.99	−0.18	−1.56
和布克赛尔	0.37	6.80*	0.35	5.09	0.18	1.56	−0.17	0.16
克拉玛依	0.74	5.74	0.12	4.93	0.83	1.33*	−0.21	−0.52
炮台	−1.58	6.84*	−0.24	6.01*	−1.64*	−0.17	0.29	1.01
乌苏	3.83***	12.20**	0.55	8.07*	2.86***	2.20*	0.42	1.93
沙湾	0.73	9.62*	0.71	6.95*	−0.51	0.80	0.53	1.87
全区域	0.59	8.87*	0.48	6.53*	−0.14	1.30	0.21	1.04
地区西北部	−0.13	8.89	0.50	6.70	−0.75	1.42	0.12	0.76
地区南部	0.99	9.55**	0.34	7.01*	0.24	0.94	0.41*	1.60
地区中东部	0.55	6.27*	0.24	5.01*	0.50	1.45*	−0.19	−0.18

注:*、**和***分别表示通过0.05、0.01和0.001显著性水平检验。下同。

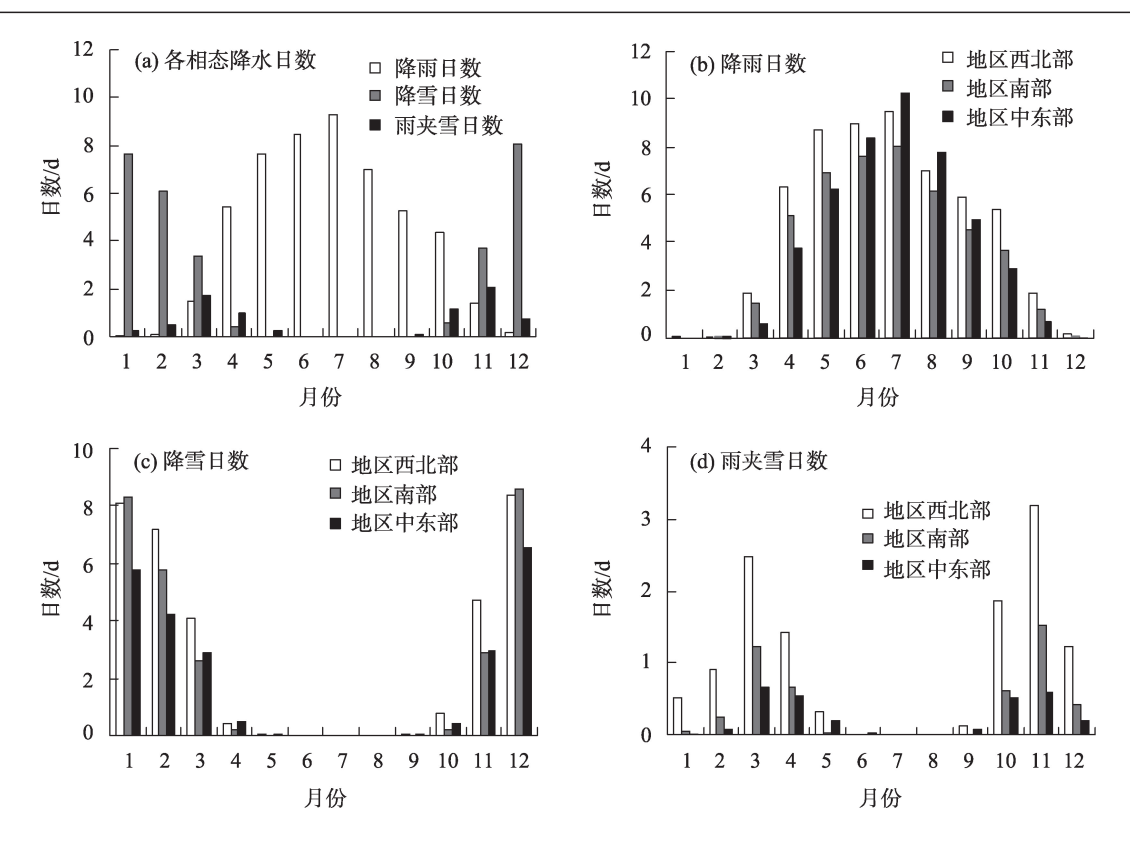


图3　1961—2020年塔城地区不同相态降水日数月际分布

Fig. 3　Monthly distributions of different precipitation types in Tacheng area from 1961 to 2020

1月次之；雨夹雪主要出现在3—4月和10—11月，以11月最多(2.1 d)，3月次之，同时此期也是雨雪转换过渡期，3种相态的降水均有发生。塔城地区不同区域降水日数月际分布表明(图3b~d)，7月和8月地区中东部降雨日数最多，其余月以地区西北部最多；1月和12月地区南部降雪日数最多，其余月份地区西北部最多；雨夹雪日数基本表现为地区西北部>地区南部>地区中东部。

由表2可知，塔城地区各站月降雨日数极值及出现时间不太一致，最多值在15~22 d之间，地区西北部和中东部大多出现在7月，地区南部出现在5月和7月；月降雪日数最多值在14~21 d之间，大多出现在12月，1月次之；月雨夹雪日数最多值主要集中在8~10 d之间，大多出现在11月，12月次之。3种相态降水日数月极值出现的月份与其平均降水日数和降水量最多值出现月份具有很好的对应

表2　塔城地区各站不同相态降水日数月极值及出现时间

Tab. 2　Extreme monthly values of different precipitation types and occurrence time in Tacheng area

站点	降雨日数		降雪日数		雨夹雪日数	
	最多/d	时间(年-月)	最多/d	时间(年-月)	最多/d	时间(年-月)
塔城	17	2020-05，1992-07	18	2020-12	11	2018-11
裕民	21	2016-07	16	2020-12	10	2011-11
额敏	17	2002-06，2013-07	16	2010-01	8	1990-03，1987、2004、2015-11
托里	22	2016-07	15	1984-11，1966、1976、2012-12	8	1994-11
和布克赛尔	22	2013-07	14	1984-11	4	1965-10，1981-04
克拉玛依	17	1961-07	18	1988-01	9	1989-12
炮台	16	1988-05	20	1977-12	7	2010-03
乌苏	16	1988-05	18	1966-12，2019-01	10	1989-12
沙湾	15	1988-05，1993-07	21	2006-12	8	2015-12

关系。

3.2.2 不同相态降水的年际变化 1961—2020年塔城地区年平均降水日数88.1 d,其中降雨日数最多,为50.5 d,占年降水日数的57.3%;降雪日数次之,为29.8 d(33.8%);雨夹雪日数最少,为7.7 d。塔城地区年平均降水量213.2 mm,其中降雨量146.9 mm,占年降水量的68.9%,降雪量38.7 mm(18.2%),雨夹雪量27.6 mm。

塔城地区不同相态降水日数年际变化曲线(图4a)表明,年降水日数1993年最多(111.3 d),1997年最少(61.2 d)。其中降雨日数2016年最多(63.4 d),1997年最少(31.3 d);降雪日数2010年最多(43.2 d),2020年最少(15.6 d);雨夹雪日数2004年最多(14.0 d),1967年最少(2.1 d)。3种相态降水日数的异常性相对一致,以正常年份最多,发生概率在63.3%~70.0%之间。其中降雨日数正常年份有38 a,偏多13 a,偏少6 a,特少3 a(1997、1974、1991年);降雪日数正常年份有40 a,偏多5 a,特多2 a(2010、1966年),偏少12 a,特少1 a(2020年);雨夹雪日数正常年份有42 a,偏多7 a,特多2 a(2004、1987年),偏少8 a,特少1 a(1967年)。

塔城地区不同相态降水量年际变化曲线(图4b)表明,年降水量2016年最多(363.6 mm),1974年最少(120.4 mm);降雨量2016年最多(271.3 mm),1997年最少(67.6 mm);降雪量2010年最多(101.1 mm),1965年最少(17.1 mm);雨夹雪量2010年最多(76.7 mm),1967年最少(5.8 mm)。

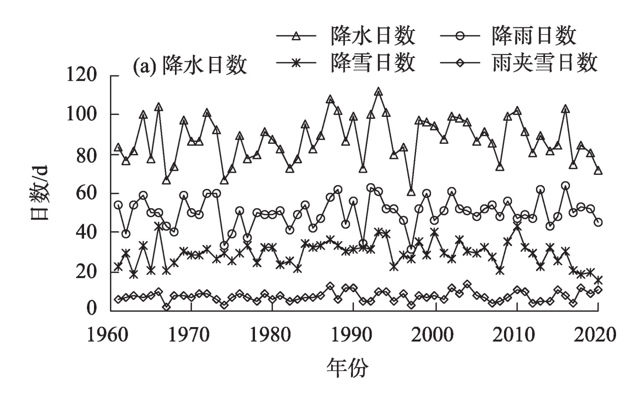
对比分析发现,塔城地区降雨量与降水量的年际变化趋势基本一致,可见降雨在降水中占主导作用。雨夹雪日数与降雪日数之比约为1:4,雨夹雪量与降雪量之比约为7:10。这主要是因为雨夹雪天气多出现在季节转换期,冷暖空气交绥频繁,易产生较大量级的降水。

3.3 不同相态降水与经纬度、海拔高度的关系

由表3可知,塔城地区不同相态降水表现出明显的经度地带性和纬度地带性。3种相态降水日数和降水量与经度呈显著负相关,与纬度呈正相关。说明降水日数和降水量随经度减小、纬度增加呈增加趋势,即降水由东南向西北逐渐递增。而海拔高度与3种相态降水的相关性不明显,这与江淮地区各相态降水与海拔呈显著正相关[5]的结论有所不同。

3.4 雪雨比率变化特征

雪雨比率(降雪量/降雨量)独立于降水量的时间和强度变化之外,排除了温度长期趋势对于降雪的影响,能够很好地衡量不同相态降水之间的差异性[23]。近年来,全球范围内对于雪雨比的变化越来越重视,Karl等[24]在1993年最先发现,在北美洲地



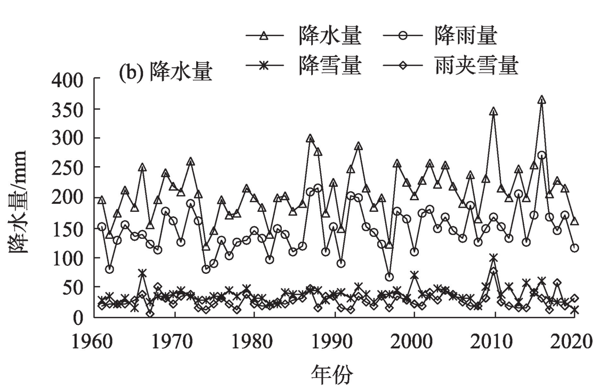


图4 1961—2020年塔城地区不同相态降水日数和降水量年际变化

Fig. 4 Inter-annual variations of days and amount of different precipitation types in Tacheng area from 1961 to 2020

表3 塔城地区不同相态降水日数和降水量与地理位置的关系

Tab. 3 Relation between days and amount of different precipitation types and geographical parameters in Tacheng area

地理位置	降雨日数	降雨量	降雪日数	降雪量	雨夹雪日数	雨夹雪量	年降水日数	年降水量
经度	-0.82**	-0.81**	-0.72*	-0.82**	-0.93***	-0.84**	-0.88**	-0.86**
纬度	0.67*	0.45	0.11	0.39	0.52	0.43	0.48	0.45
海拔高度	0.39	0.24	0.11	-0.12	0.00	-0.16	0.20	0.04

区1980—1990年的降雪比率相比于1950—1979年呈现出显著性的下降。随后在英国[13]、美国西部[14]、青藏高原[16]和中国天山山区[17]均被不同程度地观测到雪雨比下降，降水呈现出多雨化的现象。

气候变暖不但导致降水量发生变化，而且也影响了不同相态降水在总降水量中的比例[25]。近60 a，塔城地区降水相态的格局正在发生转变，降雨日数/总降水日数、雨夹雪日数/总降水日数分别以0.21%·$(10a)^{-1}$、0.20%·$(10a)^{-1}$的速率增加，降雪日数/总降水日数呈减少趋势，气候倾向率为−0.40%·$(10a)^{-1}$；降雨比率（降雨量/总降水量）以0.27%·$(10a)^{-1}$的速率增加，降雪比率（降雪量/总降水量）以−0.21%·$(10a)^{-1}$的速率减小，雨夹雪比率（雨夹雪量/总降水量）以−0.06%·$(10a)^{-1}$的速率减小。

塔城地区降雪日数/降雨日数呈下降趋势，气候倾向率为−0.87%·$(10a)^{-1}$；雪雨比率亦以−0.33%·$(10a)^{-1}$的速率减小，递减幅度高于新疆雪雨比［−0.10%·$(10a)^{-1}$］的下降幅度[26]。这与Guo等[17]指出的雪雨比率在天山北坡的西部和中部呈减少趋势的结论相吻合。塔城地区雪雨比率下降，说明降水相态呈现多雨化趋势，这是降雨比率增加而降雪比率减小，降雨量增速大于降雪量增速所导致的必然结果。

3.5 降水相态变化的影响因素

（1）温度

降水以何种相态发生的概率与气温存在着明确的指数关系[1]。气温的气候态分布，决定了降水相态的分布情况[27]，塔城地区地面年平均气温以0.38 ℃·$(10a)^{-1}$速率显著增暖，平均最低气温增速0.54 ℃·$(10a)^{-1}$，极端最低气温增速0.97 ℃·$(10a)^{-1}$，增暖幅度高于全球、中国、新疆的增温水平，各季中尤以冬季增暖最为显著。对研究区域内塔城和克拉玛依2个探空站850 hPa、700 hPa、500 hPa年平均气温变化分析表明，850 hPa增暖速率在0.10~0.15 ℃·$(10a)^{-1}$之间，700 hPa增暖速率在0.07~0.10 ℃·$(10a)^{-1}$之间，500 hPa增暖速率在0.08~0.12 ℃·$(10a)^{-1}$之间。这与张连成等[28]指出的新疆区域对流层低、中层年平均气温呈上升趋势的结论相一致。对流层中低层气温增暖有利于降水相态由固态向液态转变，这是塔城地区雪雨比率下降的关键驱动因素。

（2）水汽

大多数观测资料研究证实，大气水汽含量的变化与温度之间存在很强的正反馈效应[29]。随着全球增温，近地层温度上升，加剧地表蒸发，变暖的大气有较高的水汽饱和比，导致大气水汽含量增加。自20世纪70年代至21世纪初，北半球大多数地区对流层水汽的变化都呈增加趋势[30]。水汽压可以间接表示大气中的水汽含量，水汽压越大，水汽含量越大。近60 a塔城地区地面年平均水汽压为5.60 hPa，整体以0.10 hPa·$(10a)^{-1}$的速率显著增加，各站增速在0.04~0.21 hPa·$(10a)^{-1}$之间。塔城和克拉玛依2个探空站850 hPa和700 hPa比湿分别以每10 a 0.02~0.04 g·kg^{-1}和0.03~0.05 g·kg^{-1}的速率增加，500 hPa比湿变化微弱。地面水汽压和对流层中低层比湿的增加趋势与3种相态降水量的增加趋势相一致。

（3）大气环流

对塔城地区不同相态降水比率与大气环流因子进行相关性计算，选取相关性明显的因子进行分析（表4），塔城地区雨夹雪比率、降雪比率和雪雨比率与北极涛动指数（Arctic oscillation index，AO）、北大西洋涛动指数（North Atlantic oscillation index，NAO）呈负相关，与北半球极涡面积（强度）呈正相关，与北半球极涡中心经向、纬向位置负相关，降雨比率则反之。AO、NAO正位相，限制了极地冷空气向南扩展，北半球极涡面积收缩，强度减弱，中心经向位置东移，中心纬向位置北移，对降雪和雨夹雪起抑制作用，但有利于降雨的产生。极涡是极地高

表4　塔城地区不同相态降水比率与大气环流的关联

Tab. 4　Relation between ratios of different precipitation types and atmospheric circulation in Tacheng area

环流指数	NAO	AO	北半球极涡面积	北半球极涡强度	北半球极涡中心经向位置	北半球极涡中心纬向位置
降雨比率	0.27*	0.28*	−0.13	−0.18	0.10	0.21
雨夹雪比率	−0.12	−0.20	0.11	0.12	−0.05	−0.03
降雪比率	−0.27*	−0.22	0.20	0.17	−0.18	−0.27*
雪雨比率	−0.31*	−0.30*	0.17	0.19	−0.20	−0.24

注：*表示在0.05水平上双侧相关；AO、NAO分别为北极涛动指数、北大西洋涛动指数。

空冷性大型涡旋系统，其位置、强度以及移动对中高纬度的天气都有明显的影响，近60 a，北半球年（冬季）极涡面积（强度）呈显著减少（减弱）趋势，说明冷空气活动范围减小，强度有所减弱，这是塔城地区降雪日数减少，雪雨比率下降的重要原因。

4 讨 论

降水相态的变化是气候变暖的一个重要表现，在全球气候变暖的背景下，新英格兰[13]、美国中部地区[15]和青藏高原[16]雪雨比率呈下降趋势，是降雪量的减少和降雨量的增加所导致的结果。近60 a塔城地区降水相态更多地以降雨形式出现，但增温对降水相态的影响与以上区域略有不同，表现为降雨日数增加而降雪日数减少，降雨量和降雪量均呈增加趋势，但降雨量增速高于降雪量增速，从而导致雪雨比率下降。通过对塔城地区不同等级降雪日数的分析发现，降雪日数减少主要是微量降雪日数减少造成的结果，可见增温对微量降雪的影响最明显。塔城地区降雪量呈现增加趋势，可能归因于气温持续增暖致使水汽含量增大，增加的降雪量会抵消甚至超过因气温升高而减少的那部分降雪。

当前，全球及区域气候变暖正在并将持续对降雪、降雨的比例产生重要影响，秦艳等[31]研究发现，在RCP4.5气候情景下，相比1986—2005年，到21世纪中期，天山山区降雪比率将明显减少。R/S分析表明，未来塔城地区增暖态势将持续，气温对降水相态的影响将进一步加剧，不仅影响积雪的分布和消融，致使积雪融化时间提前，河水径流峰值时间提前，还可能增大融雪型或混合型洪水发生的风险，对于依赖融水为主要水资源的塔城地区有着非常重要的影响。

5 结 论

本文分析了塔城地区不同相态降水的时空变化特征，从气候变化及大气环流等方面探讨影响降水相态变化的可能因素，得出以下主要结论：

（1）受海拔高度、地形和山势走向的影响，塔城地区不同相态降水空间分布总体表现为地区西北部多、中东部少，区域差异明显。不同相态降水的年际变化趋势也不一致，降雨日数以0.48 d·(10a)$^{-1}$的速率不显著增加，降雪日数以−0.14 d·(10a)$^{-1}$的速率不显著减少，雨夹雪日数不显著增加；3种相态降水量均呈增加趋势。

（2）塔城地区3种相态降水日数的异常性相对一致，均以正常年份最多，发生概率在63.3%~70.0%之间，特多或特少年份的出现概率极小，在5.0%以下。

（3）雪雨比率的变化可以很好的衡量不同相态降水之间的变化差异，塔城地区雪雨比率呈减少趋势，气候倾向率达−0.33%·(10a)$^{-1}$，表明降水相态呈现多雨化趋势，这是气温增暖和大气环流共同作用的结果。

参考文献（References）

[1] Ding B H, Yang K, Qin J, et al. The dependence of precipitation types on surface elevation and meteorological conditions and its parameterization[J]. Journal of Hydrology, 2014, 513: 154−163.

[2] Wu B Y, Yang K, Zhang R H. Eurasian snow cover variability and its association with summer rainfall in China[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2009, 26(1): 31−44.

[3] 刘彤, 闫天池. 我国的主要气象灾害及其经济损失[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(2): 90−95. [Liu Tong, Yan Tianchi. Main meteorological disasters in China and their economic loss[J]. Journal of Natural Disasters, 2011, 20(2): 90−95.]

[4] 孙燕, 尹东屏, 顾沛澍, 等. 华东地区冬季不同降水相态的时空变化特征[J]. 地理科学, 2014, 34(3): 370−376. [Sun Yan, Yin Dongping, Gu Peishu, et al. The spatial and temporal variations of different precipitation phases in eastern China during winter[J]. Scientia Geographica Sinica, 2014, 34(3): 370−376.]

[5] 王传辉, 姚叶青, 李刚, 等. 江淮地区不同相态降水日数变化特征[J]. 气象科技, 2018, 46(4): 753-759. [Wang Chuanhui, Yao Yeqing, Li Gang, et al. Variation characteristics of in precipitation days with different phases in Yangtze-Huaihe Region[J]. Meteorological Science and Technology, 2018, 46(4): 753−759.]

[6] 刘原峰, 朱国锋, 赵军, 等. 黄土高原区不同降水相态的时空变化[J]. 地理科学, 2016, 36(8): 1227−1233. [Liu Yuanfeng, Zhu Guofeng, Zhao Jun, et al. Spatial and temporal variation of different precipitation type in the Loess Plateau area[J]. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(8): 1227−1233.]

[7] 杨晓玲, 汪宗成, 杨梅, 等. 河西走廊东部主要相态降水日的气候特征[J]. 干旱区研究, 2018, 35(2): 404−411. [Yang Xiaoling, Wang Zongcheng, Yang Mei, et al. Climatic characteristics of rainfall and snowfall days in the east Hexi Corridor[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(2): 404−411.]

[8] 张俊兰, 彭军. 北疆春季降水相态转换判识和成因分析[J]. 高原气象, 2017, 36(4): 939−949. [Zhang Junlan, Peng Jun. A forecast analysis of precipitation phase transformation and rainfall intensi-

ty in spring over northern Xinjiang[J]. Plateau Meteorology, 2017, 36(4): 939-949.]

[9] 余金龙, 朱红芳, 邱学兴, 等. 安徽冬季地面降水相态的判别研究[J]. 气象, 2017, 43(9): 1052-1063. [Yu Jinlong, Zhu Hongfang, Qiu Xuexing, et al. A method to determine winter precipitation type in Anhui[J]. Meteorological Monthly, 2017, 43(9): 1052-1063.]

[10] 阎琦, 崔锦, 杨青. 2018年辽宁两次雨转暴雪过程对比分析[J]. 干旱气象, 2019, 37(6): 944-953. [Yan Qi, Cui Jin, Yang Qing. Comparative analysis of two rain to snowstorm processes in Liaoning in 2018[J]. Journal of Arid Meteorology, 2019, 37(6): 944-953.]

[11] 王清平, 谭艳梅, 陈春艳, 等. 乌鲁木齐机场一次寒潮多相态降水过程分析[J]. 气象与环境科学, 2018, 41(3): 107-114. [Wang Qingping, Tan Yanmei, Chen Chunyan, et al. Process analysis of multi-phase precipitation during cold wave at Urumqi international airport[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2018, 41 (3): 107-114.]

[12] 任瑞, 李雪梅, 李兰海. 中国天山山区降水相态转变的驱动因子辨析[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(3): 112-117. [Ren Rui, Li Xuemei, Li Lanhai, et al. Discrimination of driving factors of precipitation forms in Tianshan Mountains area of China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, 34(3): 112-117.]

[13] Huntington T G, Hodgkins G A, Keim B D, et al. Changes in the proportion of precipitation occurring as snow in New England (1949—2000)[J]. Journal of Climate, 2004, 17(13): 2626-2636.

[14] Knowles N, Dettinger M D, Cayan D R. Trends in snowfall versus rainfall in the western United States[J]. Journal of Climate, 2006, 19(18): 4545-4559.

[15] Feng S, Hu Q. Changes in winter snowfall/precipitation ratio in the contiguous United States[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2007, 112: D15109, doi: 10.1029/2007JD008397.

[16] 王杰. 1961—2014年青藏高原降雪比例变化分析[D]. 兰州: 西北师范大学, 2017. [Wang Jie. Change of snowfall/precipitation ratio in the Tibetan Plateau during 1961—2014[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2017.]

[17] Guo L P, Li L H. Variation of the proportion of precipitation occurring as snow in the Tianshan Mountains, China[J]. International Journal of Climatology, 2015, 35(7): 1379-1393.

[18] Berghuijs W R, Woods R A, Hrachowitz M. A precipitation shift from snow towards rain leads to a decrease in streamflow[J]. Nature Climate Change, 2014, 4(7): 583-586.

[19] Safeeq M, Shukla S, Arismendi I, et al. Influence of winter season climate variability on snow-precipitation ratio in the western United States[J]. International Journal of Climatology, 2015, 36: 3175-3190.

[20] 井立红, 高婧, 秦榕, 等. 塔城地区1960—2018年季节性冻土变化特征及影响因子分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(3): 88-93. [Jing Lihong, Gao Jing, Qin Rong, et al. Affecting factors and change characteristics of seasonal frozen soil in Tacheng area during 1960—2018[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2019, 13(3): 88-93.]

[21] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007: 128-135. [Wei Fengying. Modern climatic statistical diagnosis and prediction technology[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007: 128-135.]

[22] 谢培, 顾艳玲, 张玉虎, 等. 1961—2015年新疆降水及干旱特征分析[J]. 干旱区地理, 2017, 40(2): 332-339. [Xie Pei, Gu Yanling, Zhang Yuhu, et al. Precipitation and drought characteristics in Xinjiang during 1961—2015[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(2): 332-339.]

[23] 侯冰飞, 姜超, 孙建新. 基于雪雨比的黑龙江省降水相态变化特征分析[J]. 高原气象, 2019, 38(4): 781-793. [Hou Bingfei, Jiang Chao, Sun Jianxin. Analysis of precipitation forms characteristics in Heilongjiang Province based on snowfall/precipitation ratio[J]. Plateau Meteorology, 2019, 38(4): 781-793.]

[24] Karl T R, Groisman P Y, Knight R W, et al. Recent variations of snow cover and snowfall in North America and their relation to precipitation and temperature variations[J]. Journal of Climate, 1993, 6(6): 1327-1344.

[25] 田亚林, 李雪梅, 李珍, 等. 1980—2017年天山山区不同降水形态的时空变化[J]. 干旱区地理, 2020, 43(2): 308-318. [Tian Yalin, Li Xuemei, Li Zhen, et al. Spatial and temporal variations of different precipitation types in the Tianshan Mountains from 1980 to 2017[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(2): 308-318.]

[26] 王杰, 张明军, 王圣杰, 等. 1961—2013年新疆雪雨比变化[J]. 干旱区研究, 2017, 34(4): 889-897. [Wang Jie, Zhang Mingjun, Wang Shengjie, et al. Change of snowfall/rainfall ratio in Xinjiang during the period of 1961—2013[J]. Arid Zone Research, 2017, 34 (4): 889-897.]

[27] 韩微. 极区春夏季降水相态变化特征、成因及影响研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2018. [Han Wei. Study on the characteristics, causes and effects of precipitation form changes during spring-summer period in the polar region[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2018.]

[28] 张连成, 张太西, 毛炜峄, 等. 新疆区域高空气温变化特征分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(1): 133-143. [Zhang Liancheng, Zhang Taixi, Mao Weiyi, et al. Analysis of the upper-air temperature change in Xinjiang region[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(1): 133-143.]

[29] 张京朋. 中国区域大气水汽变化的观测、模拟及其归因[D]. 兰州: 兰州大学, 2019. [Zhang Jingpeng. Observation, simulation and attribution of atmospheric water vapor change over China[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019.]

[30] Durre I, Williams J C N, Yin X, et al. Radiosonde-based trends in precipitable water over the Northern Hemisphere: An update[J]. Journal of Geophysical Research, 2009, 114: D05112, doi: 10.1029/2008JD10989.

[31] 秦艳, 赵求东, 孟杰, 等. 近58年天山降雪/降水量比率变化特征及未来趋势[J]. 农业工程学报, 2020, 36(4): 150-158. [Qin Yan, Zhao Qiudong, Meng Jie, et al. Variation characteristics and future trends of the snowfall/precipitation ratio in Tianshan Mountains in recent 58 years[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(4): 150-158.]

Temporal and spatial variation of different precipitation types in Tacheng area of Xinjiang in recent 60 years

GAO Jing[1], YANG Tao[2], LI Haiyan[2], JING Lihong[3], LIU Zhenxin[4], ZENG Hua[3]

(1. Shawan Meteorological Bureau, Shawan 832100, Xinjiang, China; 2. Xinjiang Climate Center, Urumqi 830002, Xinjiang, China; 3. Tacheng Meteorological Bureau, Tacheng 834700, Xinjiang, China; 4. Xinjiang Meteorological Information Center, Urumqi 830002, Xinjiang, China)

Abstract: Precipitation types (rain, snow, and sleet) have significant impacts on the surface runoff and energy balance. In this work, based on the data taken daily from nine meteorological stations in Tacheng area of Xinjiang, China from 1961 to 2020, and using the least-squares method and methods of correlation analysis, the temporal and spatial distribution characteristics of different precipitation types and its influencing factors are analyzed. The results show that: (1) The annual mean number of precipitation days was 88.1 d in Tacheng; rain days were the most frequent, snow days were second most common, and sleet days were the least frequent. In terms of spatial distribution, the three precipitation types were the most frequent in the northwest region of Tacheng area and the least frequent in the middle and east of the region. Anomalies of annual rain days, snow days, and sleet days were consistent; for normal years the occurrence rate was 63.3%−70.0%. (2) Rainfall was most common from April to September, snowfall was more frequent from November to March of the following year, and precipitation of three types stated coexisted from March to April and from October to November. (3) In this 60 year period, the trends related to precipitation types were different in Tacheng area were seen to change. The number of rain days was seen to increase and the number of snow days was seen to decrease; the increase in rainfall was significantly greater than the decrease in snowfall. The total number of sleet days was seen to increase, though the level of change was insignificant. The rainfall ratio was increasing, while the snowfall and sleet ratios were decreasing. The snowfall/rainfall ratio decreased at a rate of $-0.33\%\cdot(10a)^{-1}$. (4) Temperature increases were seen to induce the change in precipitation types. The change of precipitation types was also related to other factors, such as an increase in the quantity of water vapor, changes in the Arctic oscillation index/North Atlantic oscillation index, and changes in the Northern Hemisphere polar vortex index. In the future, the temperatures will continue to increase in Tacheng area, the temperature increases will further impact the observed precipitation types, which will not only affect the distribution of snows, melting of ice and snow, and recharge type in river runoffs but will also increase the risk of snow-melt floods and/or mixed floods.

Key words: different precipitation types; temporal and spatial variation; atmospheric circulation; Tacheng area of Xinjiang